

# Penning光源的电学、光谱学特性

曹健林 陈星旦

**摘要:** 对我们研制的Penning型气体放电真空紫外光源的电学、光谱学特性做了全面测试。测试结果表明,该光源填补了通常的软X射线源和气体放电光源之间的波段空隙,是一种适于实验室开展XUV波段光谱学研究工作的光源。

## 一、前言

为了满足真空紫外(VUV)光谱学研究工作的需要,特别是填补国内10—30nm之间光源的空白,我们研制了一种主要工作在这个波段的Penning型气体放电VUV光源<sup>[1]、[2]</sup>,并对其电学、光谱学特性做了全面测试。本文给出这些测试的一些主要结果和在此基础上进行的一些讨论。

## 二、电学特性

### 1. 着火(击穿)电压 $V_s$

着火电压 $V_s$ 意义为气体中出现显著的放电现象,气体由绝缘体变成导体时加在两极间的电压值。一般说来, $V_s$ 与放电室中的气体种类、气压、电极间距离、放电室(管)形状、电极的材料、形状和表面状态都有关。由于Penning放电与通常的气体放电不同,前者沿放电通道的轴向加了一个均匀磁场,因此Penning放电中的 $V_s$ 显然还与磁场强度有关。工作时在光源组装好以后,其它条件就都已固定,充入工作气体 $V_s$ 只随工作气压 $p$ 的变化而变化。

在使用Ar做工作气体时,实际测得的 $V_s$ 随 $p$ 变化曲线见图1。可以看出,在低气压条件下,尽管磁场已经将电子的空间轨道大大延长,但电子和中性原子碰撞的几率仍然很小。当中性原子的密度稍有增加,电离几率和二次电子发射也随之迅速增加,使 $V_s$ 下降。一旦中性原子密度已足够大,产生的电离和二次电子发射对维持放电已足够时,再增大气压,对 $V_s$ 的影响就不大了。

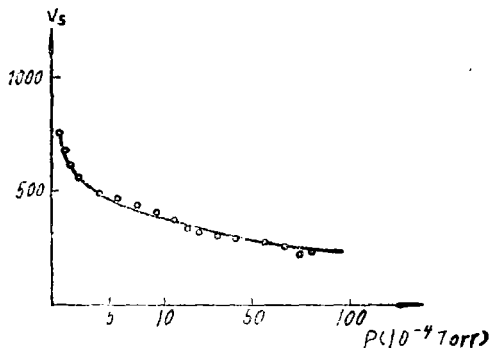


图1  $V_s$  随气压的变化

从以上结果可以看出,在 $p$ 相同的条件下, Penning放电的 $V_s$ 要比一般的气体放电低得多。在通常的辉光放电、弧光放电等光源中, $V_s$ 往往比工作电压高很多,需要一个专门的

触发电源。而Penning光源的 $V_0$ 低于工作电压，触发和工作可以共用一个电源。这无疑给使用带来了方便。

## 2. 伏安特性

实验得出的伏安特性见图2。其中图2(a)属于低气压Penning放电，图2(b)属于高气压Penning放电。在两种情况下，伏安特性都是线性的。

根据经典电磁理论并利用前人的一些工作<sup>[3]</sup>，我们导出了该光源低气压使用条件下的伏安特性表达式<sup>[2]</sup>

$$I_a = j_0 S_0 = \frac{\epsilon_0 e v_i \sigma_i n_0 B S_0}{4m v_i \ln(1 + \frac{1}{\Gamma})} V_0 \quad (1)$$

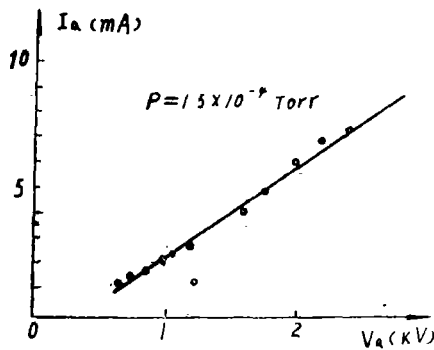


图2 (a) 低气压伏安特性

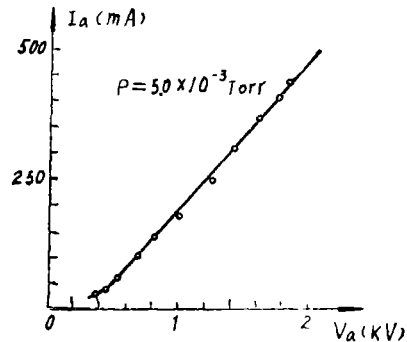


图2 (b) 高气压伏安特性

其中 $I_a$ 为放电电流， $S_0$ 为阴极的有效面积， $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数， $e$ 、 $m$ 为电子电量和质量， $v_i$ 、 $v_t$ 为电离碰撞和总碰撞频率， $\sigma_i$ 为电离截面， $B$ 为磁感应强度， $n_0$ 为中性粒子密度， $\Gamma$ 为阴极的二次电子发射系数， $V_0$ 为放电电压。所有物理量都采用MKS单位制。图2(a)可以看成是对该式的直接验证。利用有关的数据，我们还将(1)式的计算值和实测值进行了比较，二者符合得相当好。

伏安特性的测试为光源配套电源和工作状态的选择提供了依据。其线性伏安特性显然对于使用是十分方便的。

## 3. 放电电流 $I_a$ 和工作气压 $p$ 的关系

从(1)式可以看出，在 $V_0$ 不变的条件下，低气压Penning放电的 $I_a$ 和 $p$ 成正比。在测量工作中，我们将 $V_0$ 固定在不同值，改变 $p$ ，观察了 $I_a$ 随 $p$ 的变化。结果见图3(a)。可以看出， $I_a$ 和 $p$ 的关系基本是成正比的线性关系。

高压条件下的情况则大不相同。见图3(b)起初， $p$ 增大使碰撞电离增加，造成带电粒子的增加；当气压高到一定程度时，带电粒子数达到极大值。 $p$ 再增大会使电子和气体分子(原子)的碰撞过于频繁，造成电子温度 $T_e$ 的下降。当 $p$ 高到大部分电子从电场中得到的能量不足以使中性粒子电离时，放电还会熄灭。从图3(b)中可以清楚地看出这个趋势。

从图3(b)还可以看出有一个最佳气压值。一般说来， $I_a$ 的大小是放电通道中带电粒子多少的直接反应，而辐射的谱线强度，直接由等离子体中的离子数决定。 $I_a$ 大，离子数密度高，才

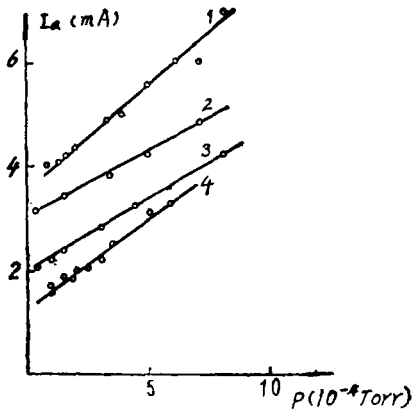


图3 (a) 低气压时  $I_a$  随  $p$  的变化

$V_a$  (1=2.5kV 2=2kV 3=1.5kV 4=1kV)

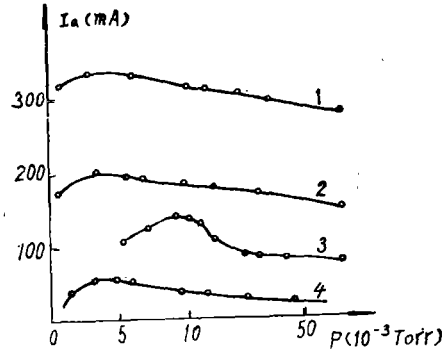


图3 (b) 高气压时  $I_a$  随  $p$  的变化

$V_a$  (1=1.4kV 2=1kV 3=0.8kV 4=0.5kV)

会有足够强的短波谱线。实验得出，光源的工作气压  $p$  最好在  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$  Torr 之间。

### 三、光谱特性

在光谱特性的测试过程中，我们先后使用了1m 正入射 VUV 单色仪 (Jobin—Yvon, 用于100nm—300nm波段) 和2.2m掠入射 VUV 单色仪 (Mcpherson—247, 用于100nm以下波段), 接收器使用了光电倍增管 (QB—9558)、通道电子倍增器 (CEM) 和柯达公司的SWR—VUV干板。

#### 1. 光谱图

用光电接收方法 (CEM和光电倍增管), 我们从16nm以上起, 得到了信噪比很好、谱线十分丰富的光谱曲线。大部分谱线根据文献<sup>[4], [5]</sup> 做了标识。(由于谱线很多和篇幅所限, 这里没有给出光谱曲线图, 其中的一些谱线, 如AlIV的  $2p^5(^2P_{1/2})3s$ 、 $2p^5(^2P_{3/2})3s$  到  $2p^5(^2P_{1/2})2p^0$  跃迁的16.01nm线、16.17nm线, MgIII  $2p^5(^2P_{1/2})3s$ 、 $2p^5(^2P_{3/2})3s$  到  $2p^5(^2P_{3/2})2p^0$  跃迁的23.17nm、23.43nm线等, 谱线强度大, 附近没有其它谱线的影响, 对 VUV 光谱仪器标定测试和其它一些光谱学工作显然是很有用的。另外, 谱线中还 包括很多像 AlIII  $2p^53s3d$  到  $2p^53d$  跃迁的16.95nm线、17.04nm线那样的双电子激发谱线。

为了在感兴趣的波段得到更多有用的谱线, 应选择不同的工作气体—阴极材料搭配。例如, 18nm以下应选Ar—Al, 18nm—26nm 应选 He—Mg, 26nm—30nm 应选  $N_2$ —Al, 而30nm以上选Ar、 $N_2$ 做工作气体都可以, Ar的谱线更多些。另外, 在30nm—100nm 波段, 光源给出的主要是工作气体的谱线。相同工作气体的不同电极材料的谱图, 基本上是一致的。因此, 对该波段感兴趣的使用者可选用耐溅射材料, 如钨、钼等制造阴极片。30nm 以下的谱线大部分由电极材料给出, 这时就要选用能在30nm 以下给出强发射线的材料来制造阴极片了。

图4、图5是使用Mcpherson—247系统 (配600线/mm凹面光栅, 分辨率0.015nm) 同时摄到的两张谱片, 其测试条件为:

工作气体: Ar                  电极材料: Al

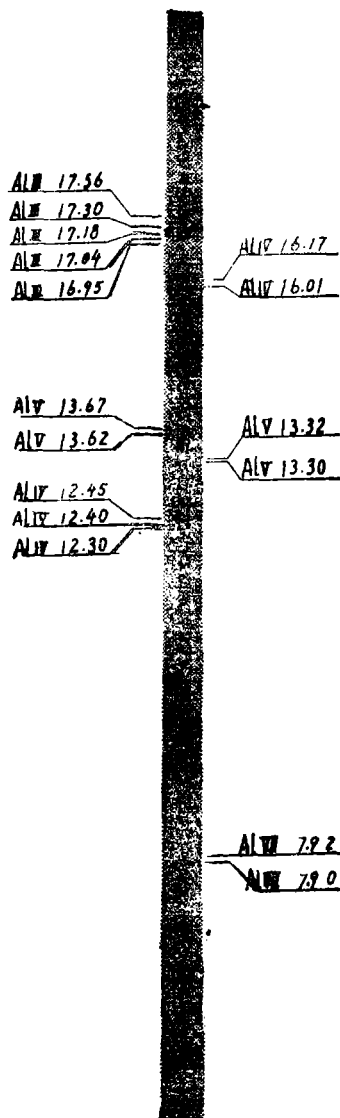


图4

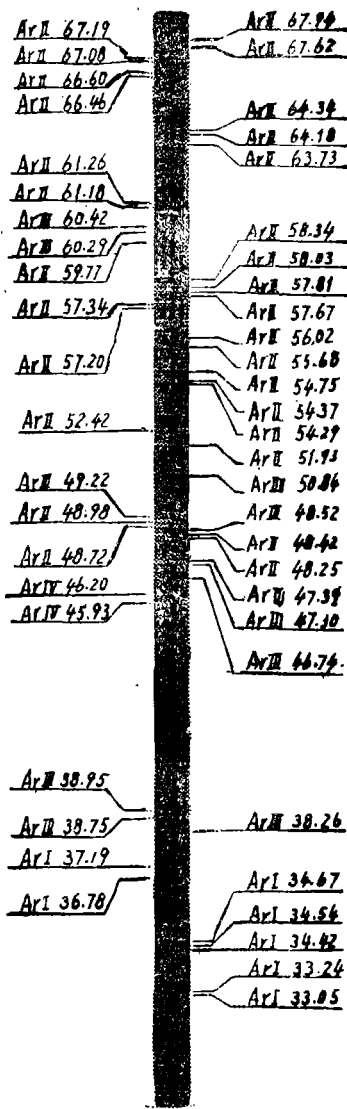


图5

工作电流  $I_d = 300 \text{ mA}$

工作气压  $p = 4.7 \times 10^{-8} \text{ Torr}$

曝光时间: 20 min

工作电压  $V_d = 1550 \text{ V}$

入射狭缝宽:  $80 \mu\text{m}$

值得指出的是,用显微密度计对图4、5的谱板进行扫描的结果表明,许多谱线曝光过度,还有许多谱线明显地曝光不足。如果根据感兴趣的波段和谱线,分别逐段选择曝光量,得到的谱线还会更多。

## 2. 放电参量对谱线强度的影响

(1) 工作电流  $I_d$ 。

光源的谱线强度主要由  $I_d$  决定。图6、图7给的其它条件不变时, He I 58.34 nm 线和

AlIV16.01nm线的谱线强度(相对)随 $I_a$ 的变化关系。

由于光源的工作气压较低,可以不考虑吸收。另外,设发光等离子体是均匀的。这样,对于电离态为 $I$ 的工作气体谱线,其光谱辐射亮度可表示成

$$I_{q,p} = \frac{h\nu_{q,p}}{4\pi} N_1 N_e X_{1,q} \tau_q A_{q,p} D \quad (2)$$

式中 $h\nu_{q,p}$ 是两能级的能量差,  $X_{1,q}$ 是电子将原子从基态碰撞激发到 $q$ 能级的激发系数,为电子温度 $T_e$ 的函数,  $\tau_q = (\sum_{p < q} A_{q,p})^{-1}$ 为 $q$ 激发态的寿命,  $A_{q,p}$ 为 $q$ 能级到 $p$ 能级的自发跃迁几率,  $D$ 为

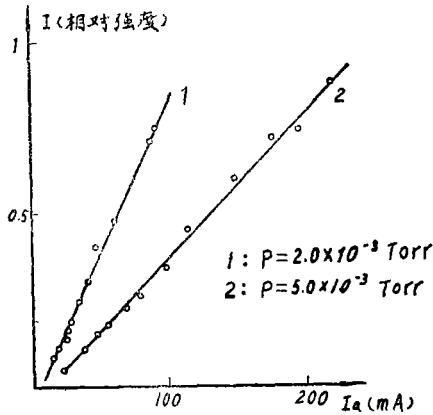


图6 HeI 58.4nm线光强随 $I_a$ 的变化  
阳极: Al 气体: He

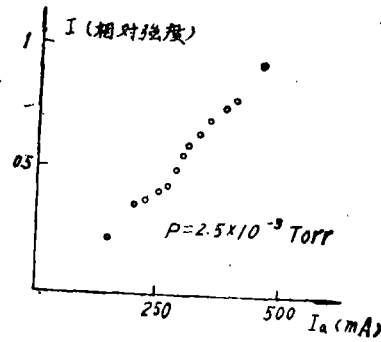


图7 AlIV16.01nm线光强随 $I_a$ 的变化  
阳极: Al 气体: Ar

发光等离子体的厚度,  $N_1, N_e$ 分别为中性原子基态和电子的数密度。在 $p$ 一定的条件下, (这时 $N_1$ 是常数) Penning放电中 $T_e$ 不随 $I_a$ 的变化而显著改变,  $X_{1,q}$ 亦可看成常数。从(2)式可知, 这时 $I_{q,p}$ 只由 $N_e$ 决定。考虑到 $j_e = N_e v_e$ 和 $I_a = S_e j_e$  (其中 $v_e$ 为 Penning 放电中电子的径向速度, 在一定范围内只由气压 $p$ 决定), 可以得出结论: 电离态为 $I$ 的工作气体谱线其辐射亮度和 $I_a$ 成正比。图6对这个结论做了很好的证明。

其它谱线其强度随 $I_a$ 的变化比较复杂。例如, 电极材料谱线的强度直接与溅射强弱相联系, 在对溅射进行定量研究的手段不足和缺乏有关资料的情况下, 我们还不能把溅射量做为放电外部参量(如 $I_a, V_a, p$ 等)的函数给出, 因而也就不能对图7的现象给出恰当的理论解释。但从图上可以看出, 当 $I_a$ 小于某一值(一般在100mA左右), 实际上观察不到电极材料的谱线, 其它方法观察也证明, 此时放电中不出现明显的溅射现象。注意到 $I_a$ 为100mA时许多气体谱线已足够强。因此, 如果只对工作气体的谱线感兴趣, 光源可以在小电流条件下工作, 这会大大延长一对阴极片的使用寿命。

### (2) 工作气压 $p$

$p$ 的高低对谱线强度亦有显著影响。在不同的 $p$ 下, 测量同一 $I_a$ 时的谱线强度, 图8、图9给出了两个典型结果。

对比这两个图可以看出, 工作气体和电极材料的谱线强度随 $p$ 的变化关系是不同的。当气压很低时, 工作气体谱线的强度随 $p$ 的增加而迅速增加, 这是激发态粒子数随基态粒子数增加而增加的直接反映; 随着 $p$ 的增加, 谱线强度达到一极大值后又迅速下降, 然后变化又变得平

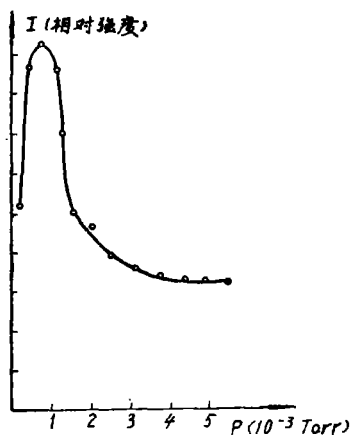


图8 He I 58.43nm线光强随 $p$ 的变化  
阳极: Al 气体: He  $I_a = 100\text{mA}$

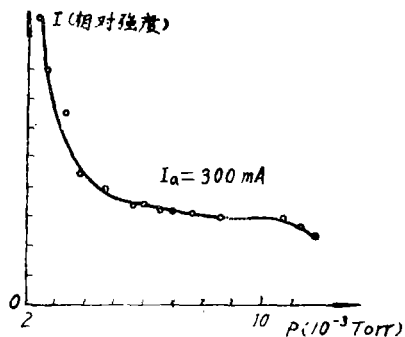


图9 Al IV 16.01nm线光强随 $p$ 的变化

坦起来 (图 8)。我们认为, 造成这种现象的原因有两个, 一是吸收 (对共振线, 吸收尤其显著); 二是激发系数  $X_{1r}(T_e)$  有一个极大值,  $p$  的增加会使  $T_e$  下降, 造成  $X_{1r}(T_e)$  的下降。当吸收和辐射达到平衡, 同时  $X_{1r}(T_e)$  随  $T_e$  的变化也变得平坦起来时, 谱线强度随  $p$  的变化就不那么剧烈了。

电极材料的谱线强度直接受溅射速率影响。溅射速率高, 进入放电通道的电极材料多, 谱线强度就强。在其它条件一定的情况下, 溅射速率随  $p$  的增高而单调下降, 谱线强度也就单调下降 (图 9)。因此, 为了得到信噪比好的电极材料谱线, 应使光源在较低的  $p$ 、较大的  $I_a$  下工作。

### 3. 光强稳定性

谱线的辐射亮度稳定性或简称为稳定性, 是光源使用中最重要的指标之一, 影响稳定性的因素是多方面的。这些因素主要有以下几个:

首先是配套电源的稳定性。如前所述,  $I_a$  的变化直接造成光强的变化。因此, 要得到稳定的辐射输出应选用高质量的电源。其次是  $p$  的变化。由于 Penning 放电对气体有吸附作用, 尽管光源采用流动气体工作, 在燃点过程中, 我们还是观察到了  $p$  的缓慢下降。第三是电极表面状态的变化, 而这种由溅射造成的变化对于 Penning 放电, 特别是对于电极材料谱线是不可避免的。最后, 接收记录系统的稳定性对测量结果也有影响。

在测试中我们采用了以下方法: 将单色仪扫描到谱线峰值处后停止扫描, 每隔 5 分钟测一下谱线的峰值高度, 然后用取样标准偏差除以平均值, 求出谱线相对强度在一小时内的不确定性。用这种方法我们得到: He I 58.43nm 线一小时内的不确定性为 2% (用光电倍增管接收); Al IV 16.01nm 线一小时内的不确定性为 4% (用 CEM 接收)。

应该指出, 当阴极片快要耗尽时, 放电会变得很不稳定, 光强出现剧烈变化。这时应该停止工作, 更换阴极片。

### 4. 一对阴极片的使用寿命

考虑到 Penning 放电的溅射现象, 我们特意将阴极设计成小片, 便于更换<sup>[2]</sup>。在测试中, 我们记录了一对阴极片在不同放电条件下的使用寿命。

使用寿命直接由工作电流决定。表1给出了Al阴极片, Ar工作气体在不同 $I_a$ 下的使用寿命。 $I_a$ 在400mA - 500mA 之间没有长期工作过, 估计可以工作3小时左右。受电源功率限制,  $I_a > 500\text{mA}$ 的实验没有做过。

阴极片的使用寿命还与材料有关。我们在测试过程中使用了 Al、Mg 两种阴极片, 后者的溅射速率要比前者大一倍, 相应的使用寿命也缩短了一半。

溅射的阴极材料全部沉积在放电室内, 主要落在阳极限孔片上。由于两极用不同材料制成, 沉积物很容易清除。拆卸光源、更换阴极片, 清除沉积物、再把光源装到单色仪上去的工作 人一小时内即可完成。

表1 阴极片的使用寿命

| 放电电流 $I_a$ (mA) | 使用寿命 (h) |
|-----------------|----------|
| <100            | 40       |
| 100—200         | 20       |
| 200—300         | 12       |
| 300—400         | 6        |

## 四、结 论

从测试结果及讨论中可以看出, Penning放电光源从几个nm起直到可见区, 都能给出信噪比很好的谱线, 工作波段宽, 谱线丰富。同工作在相应波段的其它类型光源比, 该光源体积小, 重量轻, 结构简单, 造价低, 不需要专门的辅助设备, 且能够连续工作, 适于光电接收。同空心阴极光源等一般气体放电光源比起来, 该光源的短波特性好得多。

溅射造成的使用寿命问题可通过更换阴极片得到解决。还可以选用不同材料的阴极片和选用不同的工作气体, 适应不同的光谱工作需要。一对阴极片的工作寿命已能满足绝大部分工作的要求。谱线的辐射强度稳定性达到了工作在相同波段其它光源的相应指标, 并已接近一般气体放电光源的水平。

和国外同类光源比, 该光源各方面的特性都超过了 Jo—Bin—Yvon公司的产品。在配套电源功率比文献<sup>[6]</sup>所报导的小很多的情况下, 光谱特性基本上达到了它们的指标, 并且我们的光源结构更紧凑。

## 参 考 文 献

- [1] 曹健林, Penning 放电真空紫外光源,《光学机械》, 1985, 3, 63.
- [2] 曹健林, 硕士学位论文《Penning 型真空紫外光源的研制》, 中国科学院长春光学精密机械研究所, 1985, 8.
- [3] Schurman W; Investigation of a Low Pressure Penning Discharge, Physica 1967, 36, 136.
- [4] Raymond L. Kelly,《Vacuum Ultraviolet Emission Lines (Below 2000 Å) 》, Lawrence Radiation Laboratory, University of California.
- [5] Stanley Bashkin and John O. Stoner,《Atomic Energy-Level and Grotrian Diagrams》, North-Holland Publication company, 1978.
- [6] David S. Finley et al.; Continuous discharge Penning Source with emission lines between 5nm and 30nm, Appl. Opt., 1979, 18, 649.

## Electric and Spectroscopic Characters of Penning Discharge VUV Source

Cao Jianlin Chen Xingdan

### Abstract

The electric and spectroscopic characters of a Penning discharge VUV source developed in the institute have been measured. The results of the measurements proved that this source can produce a great number of intense lines which cover the spectral gap between soft  $X$ -ray and VUV therefore, it is particularly adapted to the use in the XUV spectral region.